

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Predikce tvrdosti svarových spojů vybraných
Cr-Mo ocelí

Welded Joints Hardness Prediction Selected
Cr-Mo Steels

Student:

Kuttich Zdeněk

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Zdeněk Kuttich**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Specializace: 70 Strojírenská technologie
Téma: **Predikce tvrdosti svarových spojů vybraných Cr-Mo ocelí**
Welded Joints Hardness Prediction Selected Cr-Mo Steels

Zásady pro vypracování:

1. Provedte rešerši vlastností svarových spojů vybraných Cr-Mo ocelí.
2. Provedte studii metodik predikce tvrdosti svarových spojů.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program ověření tvrdosti svarových spojů Cr-Mo ocelí s predikcí tvrdosti výpočtem.
4. Dosažené výsledky porovnejte s lit. prameny a proveďte diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

HRIVŇÁK, I. *Teoria zvaritelnosti kovov a zliatin*. Veda 1989.
ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
KOU, S. *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, 1987.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23. května 2011




.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě tuto bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí. Jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 11/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23. května 2011


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Zdeněk Kuttich

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Vítězná 69, 784 01 Červenka

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KUTTICH, Z. *Predikce tvrdosti svarových spojů vybraných Cr-Mo ocelí: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2011, 47 s. Vedoucí práce: Ochodek, V.

Bakalářská práce se zabývá predikcí tvrdosti svarových spojů vybraných Cr-Mo ocelí. První část práce je věnována svařitelnosti ocelí, zejména ocelí P91 a 15128, praskavost vybraných ocelí a na jejich tepelné zpracování a požadavkům na tvrdost. V dalších částech je uveden rozbor algoritmů pro výpočet predikce tvrdosti svarových spojů, které využívají různé parametry ovlivňující tvrdost svarových spojů, způsob měření tvrdosti svarových spojů a praktické měření tvrdosti svarových spojů ocelí při různých navolených parametrech.

Výsledkem práce je ověření algoritmů pro oceli P91 a 15128 dle praktického měření a na základě těchto údajů stanovení vhodných algoritmů pro výpočty tvrdosti svarových spojů.

ANNOTATION OF BACHELOR WORK

KUTTICH, Z. *Welded Joints Hardness Prediction Selected Cr-Mo Steels: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine Parts and Mechanisms, 2011, 47 p. Thesis head: Ochodek, V.

The bachelor thesis considers a prediction of the selected Cr-Mo welded joints hardness. The first part of the work is focused onto the weldability of steels, especially steel P91 and 15128, onto the crackability of the selected steel and onto their thermal processing and their hardness requirements. In the next parts is stated the analysis of the algorithms for the hardness prediction calculation. Those algorithms use different parameters affecting the welded joints hardness of steels, the way of measuring and the practical hardness measuring of steel welded joints under various chosen parameters.

The result of the work is verification of the algorithms for steel P91 and 15128 according to the practical measuring and the determination of suitable algorithms for calculation of welded joints hardness.

Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů.....	7
Úvod	9
1. Studie vlastností svarových spojů vybraných Cr-Mo ocelí	10
1.1 Vlastnosti Cr-Mo ocelí.....	10
1.2 Svařitelnost ocelí P91 a 15128.....	11
1.3 Náchylnost vybraných ocelí na vznik trhlin.....	14
1.4 Technologie svařování	15
1.5 Mechanismus žáru pevnosti svařovaných ocelí	15
1.6 Žíhání ke snížení zbytkového napětí.....	16
1.7 Výpočet času ochlazování.....	17
1.8 Metalurgie základního materiálu.....	18
1.9 Volba vhodného přídavného materiálu	19
1.10 Teplotní cyklus svařování	19
1.11 Svarový kov	20
1.12 Tepelně ovlivněná oblast.....	20
2. Tvrdost svarových spojů	22
2.1 Měření tvrdosti svarových spojů dle ČSN EN 1043-1	22
2.2 Rozbor jednotlivých matematických modelů stanovení tvrdosti svarových spojů	23
2.2.1 Vývoj matematických modelů	23
2.2.2 Jednotlivé matematické modely	24
3. Návrh a realizace experimentálního programu	28
4. Porovnání a diskuze dosažených výsledků	38
4.1 Ocel P91	38
4.2 Ocel 15128	40
5. Závěr	43
6. Seznam použité literatury	44
7. Seznam příloh.....	46

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotky
A	tažnost	%
A ₅	tažnost	%
A _{c1}	teplota částečné překrystalizace	°C
A _{c3}	teplota přehřátí	°C
Al	Hliník	%
C	Uhlík	%
CE _B	uhlíkový ekvivalent viz.(2)	-
CE ₁	uhlíkový ekvivalent	%
CE ₂	uhlíkový ekvivalent	%
CE ₃	uhlíkový ekvivalent	%
Ceq	uhlíkový ekvivalent	%
Ceq1	uhlíkový ekvivalent	%
Ceq2	uhlíkový ekvivalent	%
Cr	Chrom	%
F ₂	součinitel tvaru pro dvojrozměrný tepelný tok	-
F ₃	součinitel tvaru pro trojrozměrný tepelný tok	-
H _M	tvrdost martenzitu	HV
HV	tvrdost podhousenkové zóny	HV
HV _M	tvrdost martenzitu	HV
H _{max}	maximální tvrdost viz.(6)	HV
HV _{max}	maximální tvrdost podhousenkové zóny	HV
I	svařovací proud	A
KCU	vrubová houževnatost	J·cm ⁻²
KV	nárazová práce	J
Mn	Mangan	%
Mo	Molibden	%
N	Dusík	%
Ni	Nikl	%
Nb	Niob	%
P	Fosfor	%
Q	tepelný příkon	kJ/mm

R_e	mez pevnosti v kluzu	MPa
R_m	mez pevnosti v tahu	MPa
S	Síra	%
Si	Křemík	%
T_0	teplota taveniny	K
T_{max}	maximální teplota teplotního cyklu svařování	°C
U	svařovací napětí	V
V	Vanad	%
a	konstanta	-
d	tloušťka materiálu	mm
h	největší tloušťka žíhaného materiálu	mm
$t_{8/5}$	čas ochlazování z 800°C na 500°C	s
v	svařovací rychlost	cm/min
v_c	rychlost ochlazování	°C·h ⁻¹
v_h	rychlost ohřevu	°C·h ⁻¹
x	konstanta	-
y	konstanta	-
ε	tepelná účinnost dané metody svařování	-
λ	koefficient tepelné vodivosti	Jm ⁻¹ s ⁻¹ K ⁻¹
π	Ludolfovo číslo	-
ρC	objemový tepelný obsah	Jm ⁻³ K ⁻¹

Úvod

Chrom-molybdenové oceli (dále jen Cr-Mo oceli) se používají pro výrobu vysoce namáhaných součástí různých zařízení, např. rotorů turbín, kotlových a trubkových systémů elektráren apod. Na všech strojích či zařízeních jsou obecně nejvíce zatěžovány svarové spoje a vzhledem k oblasti, kde je Cr-Mo ocel využívána, je velmi důležité, jakou tvrdostí se svarové spoje vyznačují, neboť příliš vysoká tvrdost ovlivňuje praskavost svarových spojů, což následně snižuje život namáhaných součástí různých zařízení.

Vzhledem k různým technologiím svařování a možnostem rozdílné kombinací svařovacích parametrů a parametrů tepelného zpracování, jež ovlivní čas ochlazování, díky kterému je možné dosáhnout optimální tvrdosti svarových spojů Cr-Mo ocelí, je proto odhad budoucích hodnot tvrdosti svarových spojů chrom-molybdenových ocelí důležitý, neboť právě umožňuje navolit vhodné svařovací parametry a parametry tepelného zpracování.

Výpočtem predikce se zabývalo nezávisle na sobě několik odborníků. Každý ve svých výpočtech využíval různé parametry. Někteří uvažovali s časem ochlazování a chemickým složením oceli, jiní tyto skutečnosti zcela pominuli. Tento fakt má vliv na dosažené výsledky, které se mohou lišit až o několik desítek procent nejen mezi sebou, ale také od skutečných hodnot. Proto je důležité zvolit vhodný výpočet pro zjištění parametrů k dosažení optimální tvrdosti.

Tato bakalářská práce se bude zabývat predikcí tvrdosti svarových spojů vybraných Cr-Mo ocelí, a to oceli P91 a 15128. Dále se zaměří na vliv chemického složení těchto ocelí a svařovacích parametrů a parametrů tepelného zpracování na tvrdost svarových spojů a na porovnání skutečných naměřených hodnot dosažených při použití různých svařovacích parametrů s predikcí vybraných algoritmů. Cílem bude ověření, zda vybrané algoritmy lze použít pro predikci tvrdosti těchto dvou ocelí.

1. Studie vlastností svarových spojů vybraných Cr-Mo ocelí

Tato kapitola se zabývá svařitelností Cr-Mo ocelí a zejména svařitelností ocelí P91 a 15128. Dále se zabývá jejich náchylností na vznik trhlin, žíháním ke snížení zbytkového napětí, teplotním cyklem svařování, výpočtem času ochlazování apod.

1.1 Vlastnosti Cr-Mo ocelí

Chrom-molybdenové ocele (Cr-Mo) jsou nízkolegované žárupevné a jsou legovány prvky uhlík (C), mangan (Mn), křemík (Si), chrom (Cr), molybden (Mo), vanad (V). Tyto ocele jsou určeny pro práci při teplotách nad 580 °C. Jsou odolné proti tečení, a proto se využívají pro konstrukci kotlových systémů elektráren. Především pro konstrukci kotlových těles a trubkových systémů ale i rotorů turbín, přehřívačů a dalších vysoce namáhaných součástí. [1, 6]

Cr-Mo ocele jsou díky svému chemickému složení obtížně svařitelné. Mají sklon k překalení a kvůli vysokému uhlíkovému ekvivalentu se u nich mohou častěji vyskytovat trhliny. Při svařování chromem legovaných ocelí je nutno aplikovat předehřev, protože mají velkou vrubovou citlivost. Po svařování je třeba provést tepelné zpracování. U plechů o velkých tloušťkách se občas provádí mezižhání. Provádí se po zavaření 1/2 nebo 1/3 tloušťky plechu. Nejhorším druhem trhlin jsou studené trhliny. Vznikají indukci vodíku. Vyskytují se ve svarovém kovu i v tepelně ovlivněné oblasti.

Působení slitinových prvků v oceli na tvorbu studených trhlin zkoumal Koivula [5]. V určitém rozsahu měnil chemické složení zkušebních vzorků. Na nich potom měřil kritickou hodnotu napětí a srovnával ji s mezí kluzu základního materiálu. Z pozorovaných prvků měl největší vliv na tvorbu studených trhlin molybden. Nejnižší pak chrom.

U legovaných Cr-Mo ocelí se mohou vyskytovat i horké trhliny. Dalším druhem prasklin jsou likvační. Mohou se vyskytovat v tepelně ovlivněné oblasti. Neomezují však výrazně svařitelnost Cr-Mo ocelí. Více legované Cr-Mo oceli jsou ve svarovém kovu náchylnější na krystalizační praskání. Děje se tak při uzavírání svarové vrstvy. Tyto trhliny jsou ale mělké a tak při vícevrstvé svařování se zacelují.

Většinu svarových spojů musíme žíhat kvůli velké části zbytkového austenitu. V tepelně ovlivněné oblasti se vyskytuje martenziticko-bainitická struktura. Tato struktura je nežádoucí kvůli velké tvrdosti tepelně ovlivněné oblasti. Vysoká tvrdost má za následek praskání.

V tabulce 1 jsou vypsané některé Mo a CrMo oceli. Z tabulky je patrné, že chemické složení u jednotlivých druhů ocelí má vliv na jejich provozní teploty. Z toho plyne, že každá ocel vyžaduje jiné svařovací parametry. [1]

Tabulka 1 – Seznam reprezentativních Mo a CrMo slitinových ocelí [1]

Č.	Typ	Chemické složení [hm. %]					Max. provozní teplota [°C]
		C	Mn	Si	Cr	Mo	
1	C-Mo	0,10	0,30	0,10	-	0,44	525
		0,20	0,80	0,50	-	0,65	
2	C-Mo	0,14	0,30	0,10	-	0,44	525
		Max.	0,80	0,50	-	0,65	
3	1/2Cr-1/2Mo	0,10	0,30	0,10	0,50	0,44	550
		0,20	0,61	0,30	0,81	0,65	
4	1Cr-1/2Mo	0,17	0,40	0,15	0,90	0,45	550
		Max.	0,65	0,30	1,15	0,65	
5	1 1/4Cr-1/2Mo	0,17	0,40	0,50	1,00	0,45	550
		Max.	0,65	1,00	1,50	0,65	
6	2 1/4Cr-1Mo	0,15	0,30	0,50	2,00	0,90	575
		Max.	0,60	Max.	2,50	1,10	
7	3Cr-1Mo	0,15	0,30	0,50	2,75	0,90	490-590
		Max.	0,60	Max.	3,75	1,10	
8	5Cr-1/2Mo	0,15	0,30	0,50	4,00	0,45	600
		Max.	0,60	Max.	6,00	0,65	
9	5Cr-1/2Mo (vysoký křemík)	0,15	0,30	1,00	4,00	0,45	650
		Max.	0,60	2,00	6,00	0,65	
10	5Cr-1/2Mo (Ti nebo Nb) Ti = 4 x C Nb = 8 x C	0,12	0,30	0,50	4,00	0,45	650
		Max.	0,60	Max.	6,00	0,65	
11	7Cr-1/2Mo	0,15	0,30	0,50	6,00	0,44	675
		Max.	0,60	1,00	8,00	0,65	
12	9Cr-1Mo	0,15	0,30	0,25	8,00	0,90	675
		Max.	0,60	1,00	10,00	1,10	

1.2 Svařitelnost ocelí P91 a 15128

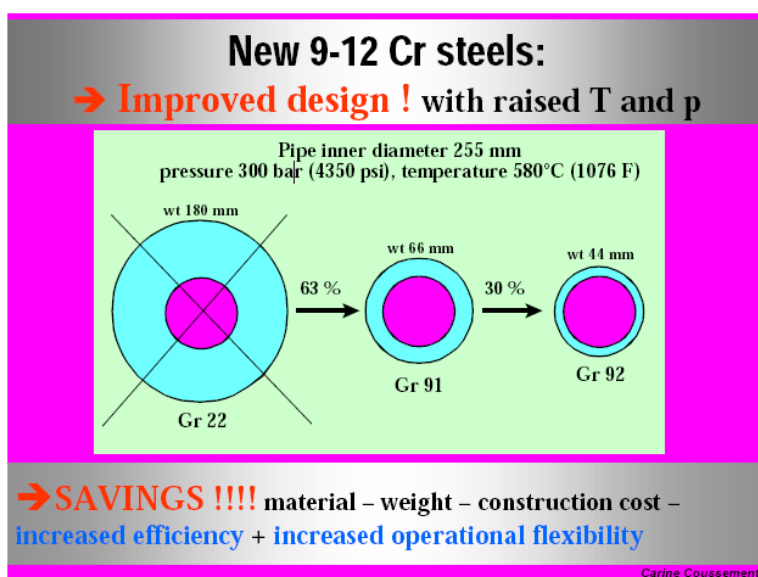
Ocel P91

Tato martenzitická ocel je nejvíce používána pro výrobu parovodního potrubí a směšovacích kusů a při opravách a rekonstrukcích českých energetických zařízení. Vyznačuje se vysokou odolností proti tečení. Díky svému dobrému chemickému složení, které je uvedeno v tabulce 2 (nejvíce zastoupené prvky jsou chrom a molybden a nejméně

zastoupeným prvkem je síra) a výborným mechanickým vlastnostem dle tabulky 3 lze u této oceli volit menší tloušťky stěn trubek. To je patrné i z obrázku 1. Na obrázku 2 je znázorněn ARA diagram, který znázorňuje anizotermický rozpad austenitu pro tuto ocel.

Ocel P91 se používá až do teplot 620 °C a pracovní teplota této oceli je 585 °C. Svařování je možné provádět všemi dostupnými metodami, ale protože je tato ocel velice citlivá na studené praskání, musí se svařovat s přehřevem. Teplota přehřevu je 200-350 °C. Po svaření musí následovat dohřev, aby vydifundoval všechen vodík.

Tepelné zpracování se provádí v rozsahu teplot 750-770 °C. Výdrž se pohybuje od 2 do 4 hodin. Tvrdost po svaření by se měla pohybovat mezi 200-350 HV. [6, 7, 18]



Obr. 1 – Tloušťky stěn trubek [19]

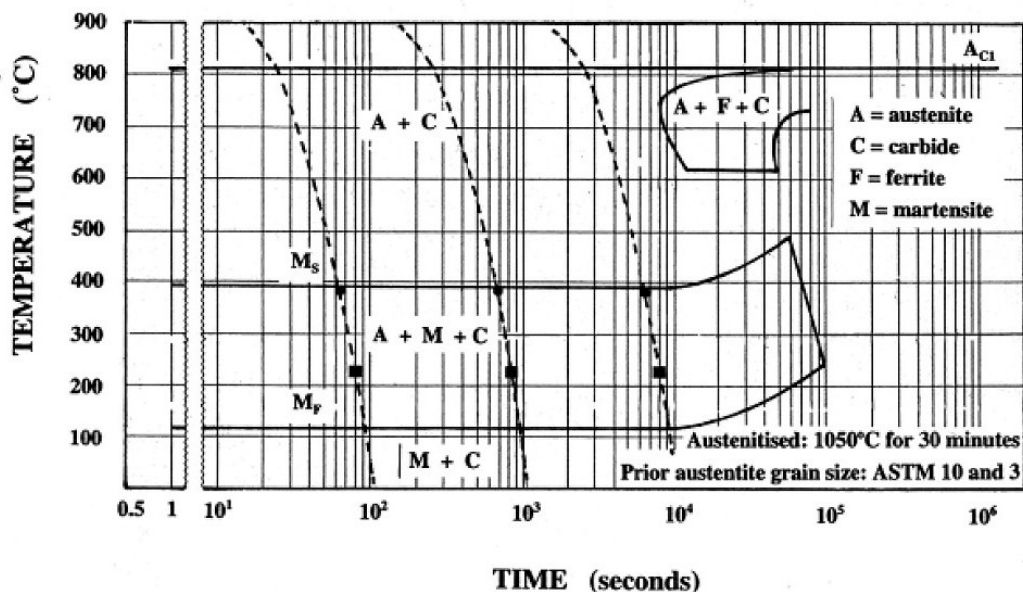
Tabulka 2 – Normalizované chemické složení [hm%] oceli P91 [8]

Ocel	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo
P91	0,08-0,12	0,50	0,30-0,60	0,025	0,015	8,00-9,50	0,85-1,05

Ocel	Ni max.	Nb	V	N	Al max.
P91	0,40	0,06-0,10	0,18-0,25	0,03-0,07	0,040

Tabulka 3 – Normalizované mechanické vlastnosti oceli P91 [8]

Ocel	Re [MPa] min.	Rm [MPa]	Tažnost A [%] min.		Nárazová práce KV [J] min.	
			podél	napříč	podél	napříč
P91	450	630-730	19	17	40	27



Obr. 2 – ARA diagram pro ocel P91 [11]

Ocel 15128

Je to nejlépe prozkoušená ocel z pohledu žárupevnosti. Tabulka 4 uvádí normalizované chemické složení této oceli. Je zde vidět, že nejvíce zastoupený prvek je chrom a nejméně se v ní vyskytuje prvek hliník. Tabulka 5 uvádí její normalizované mechanické vlastnosti. Na obrázku 3 je znázorněn ARA diagram pro tuto ocel. Ocel 15128 se používá do teplot 580 °C. Teplota předehřevu se u této oceli do tloušťky 40mm volí mezi 200-250 °C a nad tloušťku 40 mm se volí 250-350 °C. Tepelné zpracování se provádí v rozsahu teplot 680-720 °C [1, 6, 7]

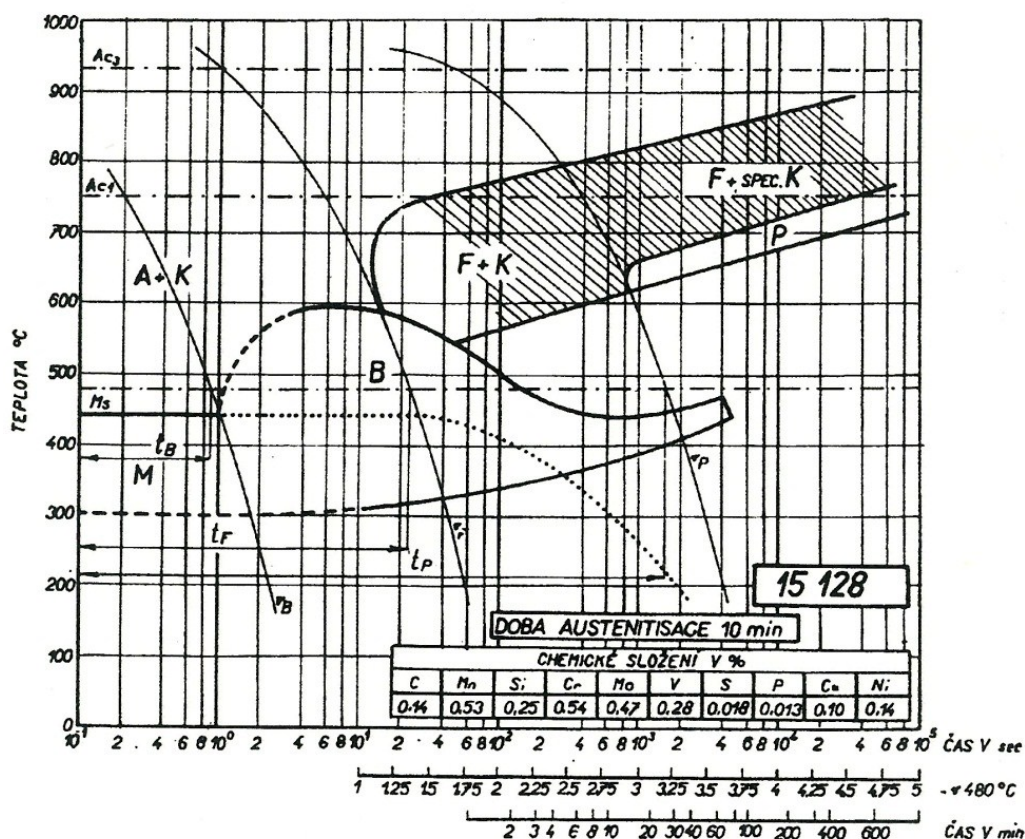
Tabulka 4 – Normalizované chemické složení [hm%] oceli 15128 [9]

Ocel	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Al max.
15128	0,10-0,18	0,45-0,70	0,15-0,40	0,50-0,75	0,40-0,60	0,22-0,35	0,025

Ocel	P max.	S max.
15128	0,040	0,040

Tabulka 5 – Normalizované mechanické vlastnosti oceli 15128 [9]

Ocel	Re [MPa] min.	Rm [MPa]	Tažnost A ₅ [%] min.	Vrbová houževnatost KCU 3 [J·cm ⁻¹] min.
15128	365	470-640	18	50



Obr. 3 – ARA diagram pro ocel 15 128 (typ 0,5Cr-0,5Mo-0,25V) [12]

1.3 Náhylnost vybraných ocelí na vznik trhlin

Trhliny ve svarovém kovu vznikají při vysokých teplotách. Nejčastěji při tuhnutí. Na jejich vznik má vliv nevhodná volba přídatného materiálu, svařovací podmínky, výskyt dusíku, podmínky ochlazování, vlastnosti ocelí za tepla a strukturní změny ve svarovém kovu. Trhliny se mohou šířit až do základního materiálu.

Oceli P91 a 15128 jsou především náchylné na vodíkové praskání, známé také jako studené praskání. Vliv na tento druh praskání má chemické složení, metoda svařování, volba přídatného svařovacího materiálu a působící napětí. Pokud je čas ochlazování příliš krátký může dojít v tepelně ovlivněné oblasti k vytvrzení. Překročí-li vodík ve svaru kritickou hodnotu, tak může svar prasknout vlivem zbytkového napětí po té, co svar vychladne.

Dále jsou tyto oceli náchylné na krystalizační praskání. Tyto praskliny bývají většinou povrchové, ale mohou se vyskytnout i po vrstvou neporušeného kovu. Mohou být také náchylné na lamelární a korozní praskání. Z důvodu korozního praskání je vysoká tvrdost svarů zcela nepřijatelná. [3, 14]

1.4 Technologie svařování

Pro svařování Cr-Mo ocelí se mohou použít všechny procesy používající se při svařování nelegovaných ocelí. Jedná se o svařování v ochranné atmosféře, laserové svařování, ruční obloukové svařování, svařování pod tavidlem a odporové svařování. Pro dosažení nejlepších vlastností svarů je dobré je tepelně zpracovat.

Svary se dělí na svary tenké a s velkou tloušťkou. Vlivem pnutí se mohou u svarů velkých tloušťek vyskytovat trhliny. Nejvíce vznik trhlín podporuje vodík. Proto je důležité jeho obsah minimalizovat. Pro zabránění nadusičení svaru se používají elektrody, které zvyšují obsah chromu. Aby byla kvalita svaru co nejlepší, musí být svarové hrany co nejčistší. Protože oxidy chromu mají vyšší teplotu tavení než svařovaná ocel, musíme používat tavidlo na odstranění oxidů ze svaru.

Při svařování tavící se elektrodou v plynové ochraně je vhodné použít kladnou polaritu na elektrodě. Směs ochranných plynů pro sprchový přenos kovu je Ar-O₂. Pro kapkový přenos kovu se používá směs Ar-CO₂ a nebo Ar-He. Pro kapkový přenos kovu je důležité použít nízké svařovací napětí a elektrodu o malém průměru. Tento proces sice vlivem malého tepelného příkonu omezuje růst zrn v tepelně ovlivněné oblasti, ale svarový spoj nemusí být dostatečně pevný. Pro sprchový přenos kovu je možné použít vyšší napětí elektrody o větším průměru. Tento svařovací proces zajišťuje větší pevnost svaru než kapkový přenos.

Při svařování ocelí legovaných chromem metodou WIG je vhodnější použít stejnosměrný proud. Záporná polarita se dává na elektrodu. Kromě argonu se dá použít ještě helium anebo jejich směs.

U svařování pod tavidlem je možné svařovat na jednu nebo více vrstev. Rychlost svařování, proud a napětí ovlivňují chemické složení svarového kovu. Proto je nutné kontrolovat svařovací podmínky. A to i přesto že je možné regulovat tepelný příkon. Pro svařování pod tavidlem se používá stejnosměrný i střídavý proud. [1]

1.5 Mechanismus žaru pevnosti svařovaných ocelí

Zpevňovací mechanismy ovlivňující žaru pevnost ocelí jsou:

- Precipitační zpevnění [4, 6, 7]
- Substituční zpevnění [4, 6, 7]

Precipitační zpevnění

Precipitační zpevnění je založeno na precipitaci (vyloučení) jemných částic karbidů chromu Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , molybdenu Mo_2C a karbonitridů v matici tuhého roztoku. U chromových žárupevných ocelí se na zpevnění podílejí karbidy M_{23}C_6 . Na velikost precipitačního zpevnění, mechanické vlastnosti a žárupevnost má vliv disperze vytvrzujících fází. Disperze precipitátů závisí na tepelném zpracování. Je to počet a střední vzájemná vzdálenost vytvrzujících fází. To je důvod, proč se při konstrukci svařenců z nízkolegovaných ocelí používají normalizované a popuštěné polotovary. Právě popuštěním se dosahuje nejvhodnější disperze vytvrzujících částic a nejvhodnějšího poměru pevnostních a plastických vlastností materiálu. [4, 6, 7]

Substituční zpevnění

U substitučního zpevnění jde o legování oceli atomy Mo a W. Ty zabraňují deformaci mřížky při realizaci creepového procesu. U nízkolegovaných Cr-Mo a CrMoV ocelí je optimální obsah Mo 0,5 %. Při přelegování oceli těmito prvky nad mez rozpustnosti se začínou vytvářet fáze Fe_2Mo nebo M_6C . Jejich precipitace snižuje precipitační zpevnění.

[4, 6, 7]

1.6 Žihání ke snížení zbytkového napětí

Žihání ke snížení zbytkového napětí (relaxační žihání) je žihání bez překrystalizace. Jeho účelem je snížení zbytkových napětí ve svarovém spoji vzniklých při svařování. Má také snížit tvrdost svaru a tepelně ovlivněné oblasti. Nejvíce efektivním způsobem pro urychlení rekystalizace je zvýšení teploty. Nesmí se ale přesáhnout maximální dovolená teplota žihání. Relaxaci napomáhá i prodloužená výdrž na žihací teplotě. Při žihání kombinovaných svarových spojů, se parametr žihání vybírá podle více legované oceli. Doporučená žihací teplota relaxačního žihání pro ocel P91 je 750-770 °C a pro ocel 15128 je 680-720 °C. Pokud je to možné, dává se přednost žihání celých svařenců. U rozměrnějších součástí se používá lokální žihání oblasti svarů. Dle ČSN 05 0211 je rychlost ohřevu dána vztahem (1) a rychlost ochlazování vztahem (2). Všeobecně pro Cr-Mo oceli by rychlost ohřevu neměla přesáhnout 220 °C/h pro tloušťky plechů do 25mm. Rychlost ochlazování by neměla pro tloušťku do 25mm přesáhnout 275 °C/h. Pro oceli P91 a 15128 se rychlost ohřevu volí 80-120 °C/h a rychlost ochlazování 100-150 °C/h. Svařenec se kontrolovaně ochlazuje až na teplotu 400 °C. Pod touto teplotou se může

nechat chladnout na vzduchu. Doba výdrže na žíhací teplotě se často volí podle praxí ověřeného kritéria 4min na 1mm tloušťky žíhané konstrukce. Pro oceli P91 a 15128 je 2-4 h.

Při vyšších teplotách se mohou vylučovat karbidy. V důsledku precipitace může nastat sekundární vytvrzování. To znamená, že tvrdost při žíhání nejprve klesá a po tom se zvyšuje. Z tohoto důvodu není někdy možné dodržet maximální dovolenou tvrdost. Některé předpisy proto tolerují vzrůst tvrdosti. [1, 2]

Rychlost ohřevu

$$v_h \leq \frac{5000}{h} \quad \text{ale platí} \quad 50 \leq v_h \leq 250 \quad (1)$$

kde: v_h je rychlost ohřevu [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$]
 h je největší tloušťka žíhaného materiálu [mm]

Rychlost ochlazování

$$v_c \leq \frac{6500}{h} \quad \text{ale platí} \quad 50 \leq v_c \leq 250 \quad (2)$$

kde: v_c je rychlost ochlazování [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$]
 h je největší tloušťka žíhaného materiálu [mm]

1.7 Výpočet času ochlazování

Při výpočtu času ochlazování se rozlišuje dvourozměrný a třírozměrný tepelný tok. To, o jaký tepelný tok se jedná, se určuje z diagramu na obrázku 4. Tento diagram vyjadřuje, zda se pro určitou kombinaci tloušťky materiálu, tepelného příkonu a teploty přehřevu jedná o dvourozměrný nebo trojrozměrný tepelný tok. Rovnice (3) a (4) platí pro dvojrozměrný tepelný tok, kde čas je závislý na tloušťce materiálu. Pro výpočet času ochlazování, kde čas není závislý na tloušťce materiálu a tepelný tok je trojrozměrný platí rovnice (5) a (6). [14]

$$t_{8/5} = \frac{Q^2}{4\pi\lambda\rho C d^2} \cdot \left(\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right) \quad (3)$$

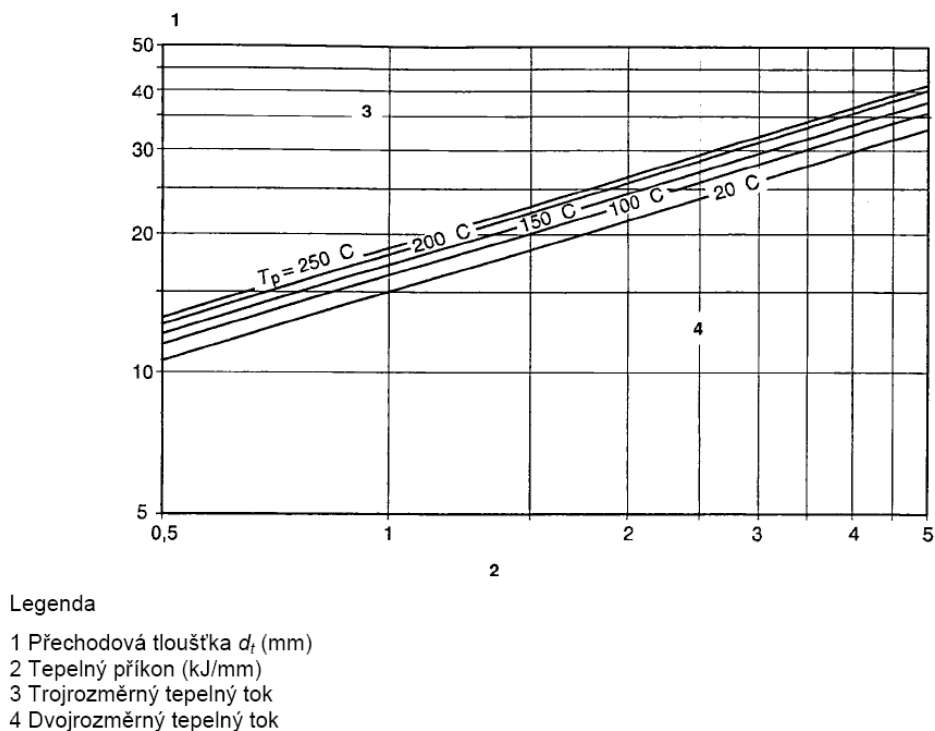
$$t_{8/5} = (4300 - 4,3T_0) \cdot 10^5 \cdot \frac{Q^2}{d^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \cdot F_2 \quad (4)$$

$$t_{8/5} = \frac{Q}{2\pi\lambda} \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \quad (5)$$

$$t_{8/5} = (6700 - 5T_0) \cdot Q \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \cdot F_3 \quad (6)$$

Kde:

$$Q = \varepsilon \cdot E = \frac{\varepsilon \cdot U \cdot I}{v \cdot 1000} \quad (7)$$



Obr. 4 – Přechodová tloušťka plechu od trojrozměrného k dvojrozměrnému tepelnému toku v závislosti na tepelném příkonu pro různé teploty předehřevu [14]

1.8 Metalurgie základního materiálu

Z důvodu transformačního zpevnění se Cr-Mo oceli tepelně zpracovávají. Vzniká martenzitickou přeměnou. Slitinové prvky snižují reakční rychlosti a zpomalují transformaci. Podle vlivu na rozpad austenitu se slitinové přísady dělí na:

1. Ty, které snižují teplotu M_S a zpomalují vytváření bainitu a perlitu. Základními prvky jsou mangan a nikl. [1]
2. Ty, snižují teplotu M_S a zpomalují vytváření feritu. Základními prvky jsou chrom a molybden. [1]

Podobný vliv jako chrom má i vanad. Zpomaluje uvolňování proeutektoidního feritu. Na pevnost Cr-Mo ocelí má velký vliv i dislokační a precipitační zpevnění. Precipitační zpevnění nastává při vylučování disperzní karbidické fáze v matrici. Nejsilnější jsou koherentní anebo semikoherentní precipitáty. [1]

1.9 Volba vhodného přídavného materiálu

Přídavný materiál musí mít stejné nebo co nejvíce podobné mechanické vlastnosti a chemické složení jako svařovaný materiál. Dále jestliže je provozní prostředí náchylné na vznik oxidace a koroze, musí mít přídavný materiál antioxidační a antikorozi vlastnosti. Oxidační odolnost svaru zvyšuje chrom. Dále zvyšuje pevnost svaru a vrubovou citlivost. Pevnost svaru zvyšuje také molybden. [1]

1.10 Teplotní cyklus svařování

Teplotní cyklus je závislost změny teploty na čase. Při svařování dochází k intenzivnímu krátkodobému místnímu ohřevu materiálu na vysokou teplotu. Tím, že dojde k natavení malého objemu materiálu, se v důsledku tepelné vodivosti nahřeje i okolní materiál. Vysoké teploty a jejich následné změny v základním materiálu způsobují při svařování:

- Fázové přeměny – tavení základního a přídavného materiálu, jeho tuhnutí a změny v tuhém stavu,
- Fyzikálně-chemické reakce,
- Změny struktury v oblasti svarového spoje,
- Změny objemu, které ve svarovém spoji způsobují vnitřní napětí a deformace.

[2, 4]

Míra a rozsah těchto uvedených změn závisí především na základním materiálu (chemické složení, fyzikální vlastnosti, geometrické rozměry) ale i na metodě svařování a množství vneseného tepla do svaru na jednotku délky. Příčinou teplotního cyklu je změna vlastností a struktury materiálu. Teplotní cykly jsou charakterizovány těmito parametry:

- Rychlost anebo čas ohřevu na maximální teplotu
- Čas výdrže nad danými teplotami (Ac_1 , Ac_3 , $T_{př}$)
- Maximální dosažená teplota cyklu T_{max}
- Rychlost ochlazování [2, 4]

Rychlosti ochlazování se podle jednotlivých metod liší. Maximální teplota cyklu a výdrž na kritických teplotách mají za následek strukturální změny. Polyformní přeměny a difuze vodíku jsou ovlivňovány účinkem ochlazovací větve teplotního cyklu. Lze ji charakterizovat časy chládnutí $\Delta t_{8/5}$ (rozmezí teplot 800 a 500 °C). [2]

1.11 Svarový kov

Svarový kov je směs roztaveného základního a přídavného materiálu. Jeho vznik je turbulentní. Podíl nataveného základního materiálu ve svarovém kovu se označuje jako promísení. Při svařování kořenové části svaru bývá stupeň promísení vyšší než při svařování jeho výplňové části. Stupeň promísení závisí na druhu použité technologie. Jeho rozmezí je od 10 % do 90 %. Rozmezí stupně promísení u ručního obloukového svařování je od 10 % do 40 %. U svařování pod tavidlem dosahuje až 85 % a u elektrostruskového svařování dosahuje až 90 %. Při použití některých technologií svařování (elektrickým odporem nebo elektronovým paprskem) je svarový kov tvořen jen nataveným základním materiálem.

Klesne-li teplota svarového kovu pod teplotu likvidu, začne ve svaru probíhat krystalizace. Při tuhnutí svarového kovu probíhají likvační a segregační procesy. Nejvýznamnějším následkem krystalizace svarového kovu je heterogenní nukleace na svarových plochách. Mikrostruktura svarového kovu je závislá především na jeho chemickém složení a svařovacích parametrech. Houževnatost svarového spoje může být nižší než u základního materiálu. [1, 2]

1.12 Tepelně ovlivněná oblast

Tepelně ovlivněná oblast (TOO) je část svarového spoje, ve které dochází ke změně mikrostruktury vlivem tepla při svařování. Při svařování kovů a jejich slitin bez polyformní přeměny se mikrostruktura v tepelně ovlivněné oblasti nemění. Dějí se jen substrukturní změny, růst zrn anebo rekystalizace. Naopak při svařování kovů a slitin s polyformní přeměnou dochází v TOO dochází ke značným strukturním změnám ovlivňující vlastnosti svarových spojů. [2]

- Oblast částečného natavení

Je to přechodová zóna z TOO do svarového kovu. U většiny ocelí se tato zóna reguluje na linii, protože rozdíl mezi teplotou likvidu a solidu je minimální.

- Oblast přehřátí

Je to oblast kde se teploty pohybují nad teplotou A_{C3} . Dochází zde k překročení teplot intenzivního růstu zrn.

- Oblast normalizace

Je to oblast vyhřátá nad A_{C3} . vzniká zde úplná polyformní transformace $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$

- Oblast částečné překrystalizace

Tato oblast se pohybuje v limitě teplot $A_{C1} - A_{C3}$. Je to pásmo bez úplné polyformní přeměny $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$.

- Oblasti vyhřáté pod teplotu A_{C1}

V této oblasti dochází k mikrostrukturním změnám v tuhém roztoku.

Vliv na změnu mikrostruktury v TOO má také chemické složení. Dalšími ovlivňujícím faktorem je rychlost ochlazování a výška teploty ovlivnění.

Svařovací parametry a jednotlivé metody svařování mají vliv na šířku tepelně ovlivněné oblasti. [2]

Snížení pevnosti v TOO nastává při těsném překročení teploty A_{C1} . Šířku popuštěné oblasti můžeme minimalizovat omezením tepelného příkonu svařování. Tvrdost pásem TOO se ověřuje pomocí algoritmů se simulovaným svařovacím cyklem nebo měřením tvrdosti. Maximální tvrdost svarového spoje by měla být mezi hodnotami 320-450 HV. [2]

2. Tvrdost svarových spojů

Tato kapitola se zabývá měřením tvrdosti svarových spojů dle normy ČSN EN 1043-1. Dále se zabývá vývojem algoritmů pro výpočet tvrdosti svarových spojů od počátku až po současnost.

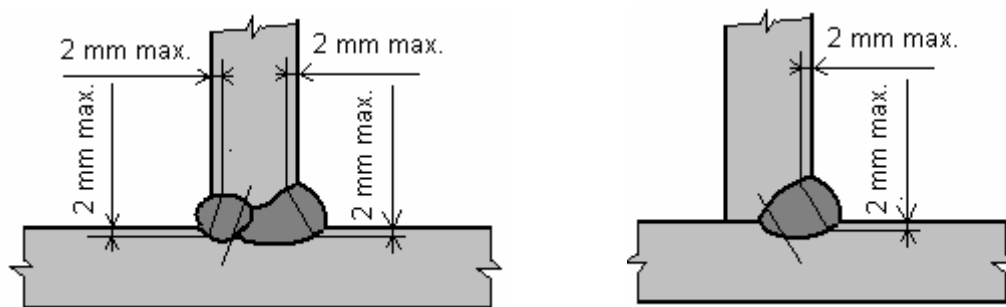
2.1 Měření tvrdosti svarových spojů dle ČSN EN 1043-1

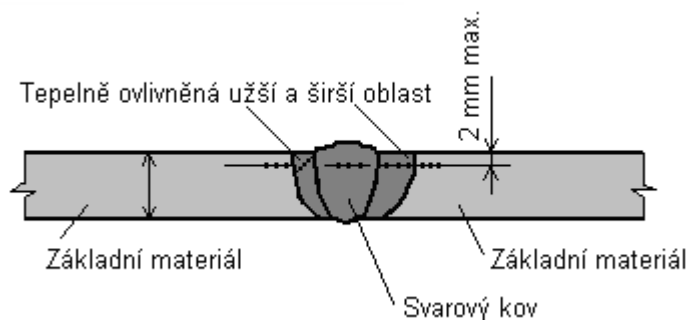
Měření tvrdosti svarových spojů je velmi důležité pro zajištění jejich životnosti a bezpečnosti. Pevnost svaru by měla být větší než u základního materiálu. To ale neplatí pro tvrdost. Čím vyšší je hodnota tvrdosti svaru, tím se materiál může stát náchylnějším ke křehkému lomu. Proto se tvrdost musí pohybovat v určitých mezích. Tvrdost také závisí na chemickém složení materiálu a na použité metodě svařování.

Zkoušky tvrdosti svarových spojů musejí být provedeny dle normy ČSN EN 1043-1. Pro měření se nejčastěji používá zkouška podle Vickerse HV 10. Ta využívá vpichů. Ty se musí provést v oblasti svarového kovu, v tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu a v základním materiálu. To nám napomáhá určit průběh tvrdosti v celém rozsahu svarového spoje.

Provádí se několik řad vpichů. Přitom jedna z nich se musí nacházet nehlouběji 2 mm pod povrchem materiálu. To je patrné z obr. 5. Každá řada musí obsahovat nejméně 3 vpichy a to ve svarovém kovu, v tepelně ovlivněné oblasti (na obě strany) a v základním materiálu také na obě strany. V tepelně ovlivněné oblasti je první vtisk proveden co nejbližší k linii ztavení. [13]

Typické příklady měření tvrdosti:





Obr. 5 – Místa měření tvrdosti u svarových spojů [13]

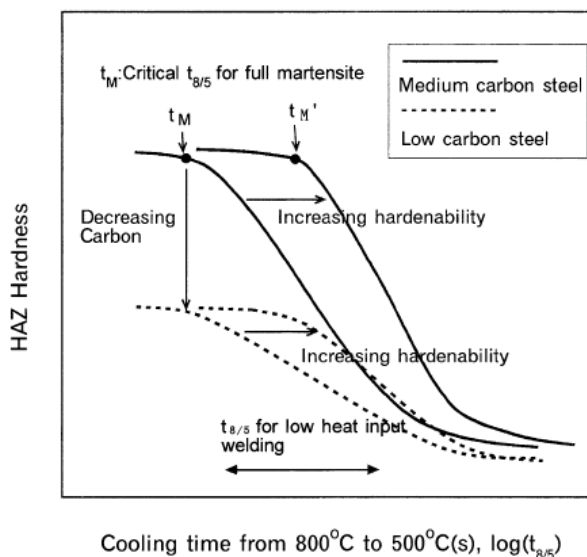
2.2 Rozbor jednotlivých matematických modelů stanovení tvrdosti svarových spojů

Tato část se zabývá vývojem výpočtových algoritmů pro výpočet tvrdosti a rozбором vybraných algoritmů.

2.2.1 Vývoj matematických modelů

V polovině 70. let se začala tvrdost svarových spojů odvozovat času chladnutí $t_{8/5}$. Čas $t_{8/5}$ vyjadřuje dobu chladnutí svaru z 800 °C na 500 °C. Je závislý na použité technologii svařování. Tvrdost se počítá pomocí parametrických rovnic. Jako je první sestavili Beckert a Holz. Ti, ale vycházeli pouze z mnoha experimentálních měření a rovnice byly založeny na empirických zkušenostech.

Při postupném vývoji další autoři nevycházeli jen z empirických znalostí, ale i z fyzikálních vlastností a podstat materiálu. Předpokládali, že křivka průběhu tvrdosti má přibližný tvar jako na obrázku 6. Nejtvrdší strukturou je martenzitická struktura. Dosahuje se jí při krátkých časech chladnutí $t_{8/5}$. Je zjištěno, že tvrdost martenzitu je závislá jen na obsahu uhlíku v oceli. [1]



Obr. 6 – Průběh tvrdosti v závislosti na čase $t_{8/5}$ [20]

2.2.2 Jednotlivé matematické modely

V této části byl proveden rozbor vybraných algoritmů pro výpočet tvrdosti svarových spojů. Jsou rozděleny na ty, které jsou závislé na času ochlazování $t_{8/5}$ a na nezávislé na času ochlazování. Dále jsou rozděleny na ty, které se používají pro výpočet tvrdosti po svaření a na výpočet po tepelném zpracování. [1]

Závislé na času ochlazování $t_{8/5}$:

Podle Dūrena 2:

$$HV = 2019 \cdot \left[C \left(1 - 0,5 \log(t_{8/5}) \right) + 0,3(CE_B - C) \right] + 66 \left(1 - 0,8 \log(t_{8/5}) \right) \quad (8)$$

Kde:

$$CE_B = C + \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{17} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3} \quad (9)$$

Podle Cottrella:

$$H_{max} = 80 + 800 \cdot (C + 3N + 0,29) \cdot C \quad (10)$$

Kde:

$$a = \left(\frac{300}{t_{8/5}} \right)^{1,5 \cdot Ceq} \quad (11)$$

$$b = \frac{Ni}{Mn^2} \quad (12)$$

$$c = \exp^{(-0,25 \cdot a + b)^{-1}} \quad (13)$$

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{3} + C + \frac{Nb}{4} + \frac{0,0001}{S} \quad (14)$$

Podle Mannesmanna:

$$H_{max} = 802 \cdot C - 452 \cdot Ca + 350aCeq + 305 - 204 \cdot 4a \quad (15)$$

Kde:

$$H_{vm} = 802 \cdot C + 305 \quad (16)$$

$$H_{vb} = 350 \cdot (C + Ceq + 101) \quad (17)$$

$$H_{vx} = 2019 \cdot [C \cdot (1 - 0,5t_{8/5}) + 0,3Ceq] + 66 - 52,8t_{8/5} \quad (18)$$

$$a = \frac{H_{vm} - H_{vx}}{H_{vm} - H_{vb}} \quad (19)$$

$$Ceq = \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Ni}{17} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3} \quad (20)$$

Podle Yuriokiho 80:

$$H_{max} = 406C + 164 \cdot Ceq1 + 183 - (369C - 149Ceq + 100) \cdot \arctan a \quad (21)$$

Kde:

$$a = \frac{\log t_{8/5} - 2,822Ceq2 + 0,262}{0,526 - 0,195Ceq2 + 0,262} \quad (22)$$

$$Ceq1 = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{5} + \frac{Nb}{5} + 10B \quad (23)$$

$$Ceq2 = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{5} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{6} + 10B \quad (24)$$

Podle Terasakiho 1:

$$HV_{max} = HV_0 + (HV_M - HV_0) \cdot \exp \left[-0,2 \cdot \left(\frac{t_{8/5}}{t_M} \right) - 1 \right] \quad (25)$$

Kde:

$$HV_M = 812 \cdot C + 293 \quad (26)$$

$$HV_0 = 164 \cdot \left(C + \frac{Si}{2} + \frac{Cr}{7} + \frac{Mo}{2} + V + Nb + 7B \right) + 153 \quad (27)$$

$$\log t_M = 2,5 \cdot \left(C + \frac{Mn}{3} + \frac{Cu}{4} + \frac{Ni}{8} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{3} + 5B \right) - 1,27 \quad (28)$$

Podle Yurioka 2:

$$HV_{max} = 220 + 442 \cdot C \cdot (1 - 0,3 \cdot C^2) + 65 \cdot \tanh(y) + [68 + 402 \cdot C \cdot (1 - 0,3 \cdot C^2) - 59 \cdot \tanh(y)] \cdot \arctg(x) \quad (29)$$

Kde:

$$x = \frac{\log t_{8/5} - 2,31 \cdot C_{E1} - 1,35 \cdot C_{E3} + 0,892}{1,15 \cdot C_{E1} - 0,673 \cdot C_{E3} - 0,601} \quad (30)$$

$$y = 2,65 \cdot C_{E2} - 0,69 \quad (31)$$

$$C_{E1} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cr \cdot (1 - 0,16 \cdot \sqrt{Cr})}{7} + \frac{Mo}{4} \quad (32)$$

$$C_{E2} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Co}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{2,5} + \frac{V}{5} + \frac{Nb}{3} \quad (33)$$

$$C_{E3} = C + \frac{Mn}{3,6} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} \quad (34)$$

Nezávislé na času ochlazování $t_{8/5}$:**Podle Terasakiho a Satoha:**

$$H_M = 812 \cdot C + 293 \quad (35)$$

Podle Dürena 1:

$$H_M = 802C + 305 \quad (36)$$

Podle Yurioka 1:

$$H_M = 884 \cdot C \cdot (1 - 0,3 \cdot C^2) + 294 \quad (37)$$

Podle Deardena:

$$HV_{max} = 1200 \cdot \left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} \right) - 200 \quad (38)$$

Podle Kihara:

$$HV_{max} = 666 \cdot \left(C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{14} + \frac{Si}{24} \right) + 40 \quad (39)$$

Podle Terasakiho 2:

$$H_{max} = 164 \cdot Ceq + 153 + (a - 164 \cdot Ceq - 153) \quad (40)$$

Kde:

$$a = 812 \cdot C + 293 \quad (41)$$

$$Ceq = C + \frac{Mn}{3} + \frac{Cu}{4} + \frac{Ni}{8} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{3} + 5B \quad (42)$$

Výpočet tvrdosti po tepelném zpracování:

Pro martenzitickou strukturu

$$HV = -74 - 434C - 368Si + 15Mn + 37Ni + 17Cr - 335Mo - 2235V + \frac{10^3}{P_{SR}} \cdot (260 + 616C + 321Si - 21Mn - 35Ni - 11Cr - 352Mo + 2345V) \quad (43)$$

Kde:

$$\frac{1}{P_{SR}} = \frac{1}{T} - 2,3 \cdot \frac{R}{\Delta H} \cdot \log t \quad (44)$$

Odkud:

$$P_{SR} = \frac{\Delta H \cdot T}{\Delta H - T \cdot 2,3 \cdot R \cdot \log t} \quad (45)$$

Pro bainitickou strukturu

$$HV = 262 + 163C - 349Si - 64Mn - 6Ni - 186Cr - 458Mo - 857V + \frac{10^3}{P_{SR}} \cdot (-149 - 43C + 336Si + 79Mn + 16Ni + 196Cr + 498Mo + 1049V) \quad (46)$$

3. Návrh a realizace experimentálního programu

Tato kapitola se zabývá problematikou zjišťování tvrdosti svarových spojů vybraných ocelí s využitím algoritmů sestavených různými odborníky a následným ověřením zjištěných hodnot praktickým měřením. Pro výpočty tvrdosti a následné praktické měření byly zvoleny žárupevné oceli P91 a 15128 protože jsou obtížně svařitelné, jejich svarové spoje jsou náchylné na praskání a dosažení optimální tvrdosti je podstatné zejména z hlediska jejich následného využití pro výrobu vysoce namáhaných součástí různých zařízení.

Svařovací parametry byly pro experimentální část zvoleny podle přídatných materiálů z katalogu firmy ESAB [17]. Přídatné materiály byly vybrány podle chemického složení vybraných ocelí. Kritériem výběru bylo, aby měl přídatný materiál co nejvíce podobné chemické složení jako vybrané oceli. Parametry tepelného zpracování byly zvoleny podle norem ocelí P91 a 15128.

Vstupními hodnotami pro jednotlivé výpočty byly minimální a maximální chemická složení vybraných ocelí, která jsou uvedena v tabulkách 6-9. Dalšími vstupními hodnotami byly svařovací parametry, které jsou uvedeny v tabulce 10 a parametry tepelného zpracování, které jsou zapsány v tabulce 11.

Tabulka 6 – Minimální hodnoty chemického složení oceli P91 [8]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,08	0,250	0,30	0,015	0,005	8,00	0,85

Ni	Nb	V	N	Al
0,20	0,06	0,18	0,03	0,020

Tabulka 7 – Maximální hodnoty chemického složení oceli P91 [8]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,12	0,50	0,60	0,025	0,015	9,50	1,05

Ni	Nb	V	N	Al
0,40	0,10	0,25	0,07	0,040

Tabulka 8 – Minimální hodnoty chemického složení oceli 15128 [9]

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Al
0,10	0,45	0,15	0,50	0,40	0,22	0,015

P	S
0,020	0,020

Tabulka 9 – Maximální hodnoty chemického složení oceli 15128 [9]

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Al
0,18	0,70	0,40	0,75	0,60	0,35	0,025

P	S
0,040	0,040

Tabulka 10 – Svařovací parametry

Metoda svařování	Přídavný materiál	Průměr přídavného materiálu	Napětí na oblouku [V]	Svařovací proud [A]	Svařovací rychlost [cm·min ⁻¹]	Tepelná účinnost [%]
111	OK 78.16	2,5	20	75-100	10-15	85
		3,2	21	105-140		
		4	22	145-195		
		5	23	190-260		
		6	25	240-330		
141	OK Tigrod 13.32	1,6	20	40-180	4-8	65
		2	21	60-200		
		2,4	23	100-220		
121	OK 13.10 SC	3	20-40	200-800	25-50	100
		4				

Tabulka 11 – Režim tepelného zpracování

Materiál	Teplota [°C]	Rychlost ohřevu [°C·h ⁻¹]	Doba výdrže [h]	Rychlost ochlazování [°C·h ⁻¹]
P91	750-770	80-120	2-4	100-150
15128	680-720	80-120	2-4	100-150

Výpočty byly provedeny pro obě oceli ve stavu po svaření a po tepelném zpracování pomocí softwaru e-Weld – Hardness [15], který obsahuje algoritmy z kapitoly 2.2.2. Vypočtené hodnoty tvrdosti ve stavu po svaření byly zapsány do tabulek 12 a 13. Ve výpočtech byla měněna chemická složení a rozsah časů ochlazování $t_{8/5}$. Výpočty tvrdosti po tepelném zpracování byly zapsány do tabulek 14 a 15. Při výpočtech byla měněna chemická složení a teploty tepelného zpracování.

Tvrdost po svaření

Tabulka 12 – Hodnoty tvrdosti pro ocel P91 vypočtené softwarem e-Weld-Hardness [15]

Ocel P91		Hodnota tvrdosti [HV]							
		Min. chemické složení				Max. chemické složení			
Čas $t_{8/5}$ [s]		5	15	25	30	5	15	25	30
Výpočet podle									
Závislé na $t_{8/5}$	Duerena 2	1311	1248	1218	1214	1582	1499	1461	1447
	Cottrella	373	360	344	335	404	391	373	363
	Mannesmanna	376	367	357	352	410	393	376	367
	Yuriokiho 80	300	300	300	300	784	784	784	784
	Terasakiho 1	441	455	463	470	465	478	485	487
	Yurioka 2	445	433	426	421	441	436	434	433
Nezávislé na $t_{8/5}$	Terasakiho a Satoha	358	358	358	358	390	390	390	390
	Terasakiho 2	358	358	358	358	390	390	390	390
	Duerena 1	369	369	369	369	401	401	401	401
	Yurioka 1	365	365	365	365	400	400	400	400
	Kihara	1353	1353	1353	1353	1533	1533	1533	1533
	Deardena 2	2147	2147	2147	2147	2503	2503	2503	2503

Tabulka 13 – Hodnoty tvrdosti pro ocel 15128 vypočtené softwarem e-Weld-Hardness [15]

Ocel 15128		Hodnota tvrdosti [HV]							
		Min. chemické složení				Max. chemické složení			
Čas $t_{8/5}$ [s]		5	15	25	30	5	15	25	30
Výpočet podle									
Závislé na $t_{8/5}$	Duerena 2	409	335	301	289	672	560	508	489
	Cottrella	388	375	358	349	452	436	416	404
	Mannesmanna	387	391	395	397	451	457	463	466
	Yuriokiho 80	310	240	222	218	438	405	374	361
	Terasakiho 1	294	281	273	271	369	357	351	349
	Yurioka 2	285	250	242	240	487	656	787	830
Nezávislé na $t_{8/5}$	Terasakiho a Satoha	374	374	374	374	439	439	439	439
	Terasakiho 2	374	374	374	374	439	439	439	439
	Duerena 1	385	385	385	385	449	449	449	449
	Yurioka 1	382	382	382	382	452	452	452	452
	Kihara	304	304	304	304	465	465	465	465
	Deardena 2	250	250	250	250	516	516	516	516

Tvrdost po tepelném zpracování

Tabulka 14 – Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování pro ocel P91 vypočtené softwarem e-Weld-Hardness [15]

Teplota [°C]/výdrž [h]	Hodnota tvrdosti po tepelném zpracování [HV]			
	Pro martenzitickou strukturu		Pro bainitickou strukturu	
	min. chem. slož.	max. chem. slož.	min. chem. slož.	max. chem. slož.
750°C/2h	-430	-523	118	0
760°C/2h	-434	-529	111	-25
770°C/2h	-439	-534	104	-50

Tabulka 15 – Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování pro ocel 15128 vypočtené softwarem e-Weld-Hardness [15]

Teplota [°C]/výdrž [h]	Hodnota tvrdosti po tepelném zpracování [HV]			
	Pro martenzitickou strukturu		Pro bainitickou strukturu	
	min. chem. slož.	max. chem. slož.	min. chem. slož.	max. chem. slož.
680°C/2h	-86	-301	172	139
700°C/2h	-102	-311	162	131
720°C/2h	-117	-321	153	124

Následující výpočty tvrdosti byly počítány pro obě oceli pomocí softwaru Weldsoft [16]. Opět byla počítána tvrdost po svaření a vypočtené hodnoty zapsány do tabulek 16-17 a hodnoty po tepelném zpracování byly zapsány do tabulek 18-23. Při výpočtech byla měněna chemická složení ocelí a svařovací parametry.

Tvrdost po svaření

Tabulka 16 – Hodnoty tvrdosti pro ocel P91 vypočtené softwarem Weldsoft [16]

Ocel P91	Hodnota tvrdosti [HV]																	
	Min. chemické složení									Max. chemické složení								
Tepelná účinnost [%]	85									85								
Svařovací parametry	U [V]	I [A]	V [cm/s]	U [V]	I [A]	V [cm/s]	U [V]	I [A]	V [cm/s]	U [V]	I [A]	V [cm/s]	U [V]	I [A]	V [cm/s]	U [V]	I [A]	V [cm/s]
	20	90	10	23	210	13	25	300	15	20	90	10	23	210	13	25	300	15
Výpočet podle																		
Arata	354			354			354			387			387			387		
Yurioka 1	299			299			300			867			867			867		
Cottrella	448			443			418			576			574			557		
Suzukiho	499			496			495			515			535			543		
Terasakiho	358			358			359			390			390			390		
Beckerta	359			359			359			397			397			397		
Duerena	785			785			785			949			949			949		
Yurioka 2	373			369			367			414			412			410		
Terasakiho 2	358			358			358			390			390			390		

Tabulka 17 – Hodnoty tvrdosti pro ocel 15128 vypočtené softwarem Weldsoft [16]

Ocel 15128	Hodnota tvrdosti [HV]																	
	Min. chemické složení									Max. chemické složení								
Tepelná účinnost [%]	85									85								
Svařovací parametry	U [V]	I [A]	V [cm/s]	U [V]	I [A]	V [cm/s]	U [V]	I [A]	V [cm/s]	U [V]	I [A]	V [cm/s]	U [V]	I [A]	V [cm/s]	U [V]	I [A]	V [cm/s]
	20	90	10	23	210	13	25	300	15	20	90	10	23	210	13	25	300	15
Výpočet podle																		
Arata	340			288			265			432			386			358		
Yurioka 1	253			206			199			414			321			300		
Cottrella	275			167			128			408			275			193		
Suzukiho	253			212			201			376			332			318		
Terasakiho	267			262			262			395			343			340		
Beckerta	175			175			175			344			256			256		
Duerena	294			244			244			449			336			336		
Yurioka 2	236			211			207			400			288			268		
Terasakiho 2	262			239			239			426			362			341		

Tvrdost po tepelném zpracování

Tabulka 18 – Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování pro ocel P91 pro zvolené svařovací parametry vypočtené softwarem Weldsoft [16]

Ocel P91	Hodnota tvrdosti [HV]											
	Min. chemické složení						Max. chemické složení					
Svařovací parametry	U=20[V], I=90[A], v=10[cm/s], $\epsilon=85[\%]$						U=20[V], I=90[A], v=10[cm/s], $\epsilon=85[\%]$					
Režim tepelného zpracování	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]
	750	2	760	2	770	2	750	2	760	2	770	2
Stav												
Po svaření	334		334		334		354		354		354	
Po tepelném zpracování	347		295		240		438		379		317	

Tabulka 19 – Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování pro ocel P91 pro zvolené svařovací parametry vypočtené softwarem Weldsoft [16]

Ocel P91	Hodnota tvrdosti [HV]											
	Min. chemické složení						Max. chemické složení					
Svařovací parametry	U=23[V], I=210[A], v=13[cm/s], $\epsilon=85[\%]$						U=23[V], I=210[A], v=13[cm/s], $\epsilon=85[\%]$					
Režim tepelného zpracování	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]
	750	2	760	2	770	2	750	2	760	2	770	2
Stav												
Po svaření	335		335		335		354		354		354	
Po tepelném zpracování	347		295		240		438		379		317	

Tabulka 20 – Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování pro ocel P91 pro zvolené svařovací parametry vypočtené softwarem Weldsoft [16]

Ocel P91	Hodnota tvrdosti [HV]											
	Min. chemické složení						Max. chemické složení					
Svařovací parametry	U=25[V], I=300[A], v=15[cm/s], $\epsilon=85[\%]$						U=25[V], I=300[A], v=15[cm/s], $\epsilon=85[\%]$					
Režim tepelného zpracování	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]
	750	2	760	2	770	2	750	2	760	2	770	2
Stav												
Po svaření	337		337		337		355		355		355	
Po tepelném zpracování	347		295		240		438		379		317	

Tabulka 21 – Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování pro ocel 15128 pro zvolené svařovací parametry vypočtené softwarem Weldsoft [16]

Ocel 15128	Hodnota tvrdosti [HV]											
	Min. chemické složení						Max. chemické složení					
Svařovací parametry	U=20[V], I=90[A], v=10[cm/s], $\epsilon=85[\%]$						U=20[V], I=90[A], v=10[cm/s], $\epsilon=85[\%]$					
Režim tepelného zpracování	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]
	680	2	700	2	720	2	680	2	700	2	720	2
Stav												
Po svaření	234		234		234		409		409		409	
Po tepelném zpracování	215		175		127		304		250		187	

Tabulka 22 – Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování pro ocel 15128 pro zvolené svařovací parametry vypočtené softwarem Weldsoft [16]

Ocel 15128	Hodnota tvrdosti [HV]											
	Min. chemické složení						Max. chemické složení					
Svařovací parametry	U=23[V], I=210[A], v=13[cm/s], $\epsilon=85[\%]$						U=23[V], I=210[A], v=13[cm/s], $\epsilon=85[\%]$					
Režim tepelného zpracování	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]
	680	2	700	2	720	2	680	2	700	2	720	2
Stav												
Po svaření	209		209		209		301		301		301	
Po tepelném zpracování	210		170		123		283		233		173	

Tabulka 23 – Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování pro ocel 15128 pro zvolené svařovací parametry vypočtené softwarem Weldsoft [16]

Ocel 15128	Hodnota tvrdosti [HV]											
	Min. chemické složení						Max. chemické složení					
Svařovací parametry	U=25[V], I=300[A], v=15[cm/s], $\epsilon=85[\%]$						U=25[V], I=300[A], v=15[cm/s], $\epsilon=85[\%]$					
Režim tepelného zpracování	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]
	680	2	700	2	720	2	680	2	700	2	720	2
Stav												
Po svaření	204		204		204		281		281		281	
Po tepelném zpracování	209		170		123		279		230		171	

V tabulkách 24 a 25 byly uvedeny hodnoty tvrdosti z výpočtů, ve kterých byly ponechány teploty žihání a svařovací parametry konstantní. Byla měněna pouze výdrž na teplotě.

Tabulka 24 – Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování pro ocel P91 pro konstantní svařovací parametry a proměnu časů vypočtené softwarem Weldsoft [16]

Ocel P91	Hodnota tvrdosti [HV]											
	Min. chemické složení						Max. chemické složení					
Svařovací parametry	U=23[V], I=210[A], v=13[cm/s], $\epsilon=85[\%]$						U=23[V], I=210[A], v=13[cm/s], $\epsilon=85[\%]$					
Režim tepelného zpracování	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]
	760	0,66	760	2	760	3	760	0,66	760	2	760	3
Stav												
Po svaření	336		336		336		354		354		354	
Po tepelném zpracování	417		295		246		518		379		323	

Tabulka 25 – Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování pro ocel 15128 pro konstantní svařovací parametry a proměnu časů vypočtené softwarem Weldsoft [16]

Ocel 15128	Hodnota tvrdosti [HV]											
	Min. chemické složení						Max. chemické složení					
Svařovací parametry	U=23[V], I=210[A], v=13[cm/s], $\epsilon=85[\%]$						U=23[V], I=219[A], v=13[cm/s], $\epsilon=85[\%]$					
Režim tepelného zpracování	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]	Teplota [°C]	Výdrž [h]
	700	0,66	700	2	700	3	700	0,66	700	2	700	3
Stav												
Po svaření	209		209		209		301		301		301	
Po tepelném zpracování	215		170		151		289		233		209	

Hodnoty tvrdosti naměřené na reálných vzorcích

Měření tvrdosti bylo provedeno firmou *Svarservis Thermoprozess Cooperheat s.r.o.* [21]. Jako vzorky byly použity trubky z ocelí P91 a 15128. Tloušťka stěny trubek byla 5 mm. Trubky byly svařeny bez předehřevu a žihány.

Do tabulky 26 byly zapsány naměřené hodnoty pro ocel P91. Svaření proběhlo bez předehřevu. Rychlost ohřevu na teplotu žhání byla 200 °C/h, teplota žhání byla 750 °C a doba výdrže na této teplotě byla 45min. Rychlost ochlazování byla 200 °C/h. Měření tvrdosti bylo provedeno v základním materiálu i ve svarovém kovu.

Tabulka 26 – Naměřené hodnoty tvrdosti oceli P91 [21]

Vzorek číslo	Tvrdost [HV]		
	Základní materiál	Svarový kov	Základní materiál
1	176	222	168
2	186	199	192
3	191	237	165
4	197	249	165
5	201	255	198

Do tabulky 27 byly zapsány naměřené hodnoty pro kombinaci ocelí P91 a 15128. Svaření proběhlo bez předehřevu. Rychlost ohřevu na teplotu žhání byla 200 °C/h, teplota žhání byla 725 °C a doba výdrže na této teplotě byla 1h. Rychlost ochlazování byla 200 °C/h. Tvrdost byla měřena v základním materiálu obou ocelí i ve svarovém kovu.

Tabulka 27 – naměřené hodnoty tvrdosti u kombinace ocelí P91 a 15128 [21]

Vzorek číslo	Tvrdost [HV]		
	Základní materiál P91	Svarový kov	Základní materiál 15128
1	183	247	150
2	187	249	168
3	197	249	165
4	198	245	173
5	201	240	157

4. Porovnání a diskuze dosažených výsledků

V kapitole 3 byly počítány tvrdosti svarových spojů pomocí dvou softwarů – Weldsoft a e-Weld-Hardness. Výpočty byly provedeny pro obě oceli ve stavu po svaření a po tepelném zpracování. Byla volena různá chemická složení a různé vstupní parametry. Dále byla provedena měření tvrdosti svarových spojů u několika tepelně zpracovaných vzorků.

4.1 Ocel P91

Hodnoty tvrdosti po svaření

Hodnoty dosažené pomocí výpočtů v softwaru e-Weld-Hardness pro minimální i maximální chemické složení se mezi sebou liší u jednotlivých použitých výpočtových algoritmů, jak lze vidět z tabulky 16. Některé vypočtené hodnoty jsou nereálné - výpočty podle Duerena 2, Deardena 2 a Kihara, proto nejsou vhodné pro další úvahy pro tuto ocel vzhledem k jejímu chemickému složení. Ostatní vypočtené hodnoty se mezi sebou liší minimálně, až na výjimky kdy rozdíl tvořil několik desítek HV.

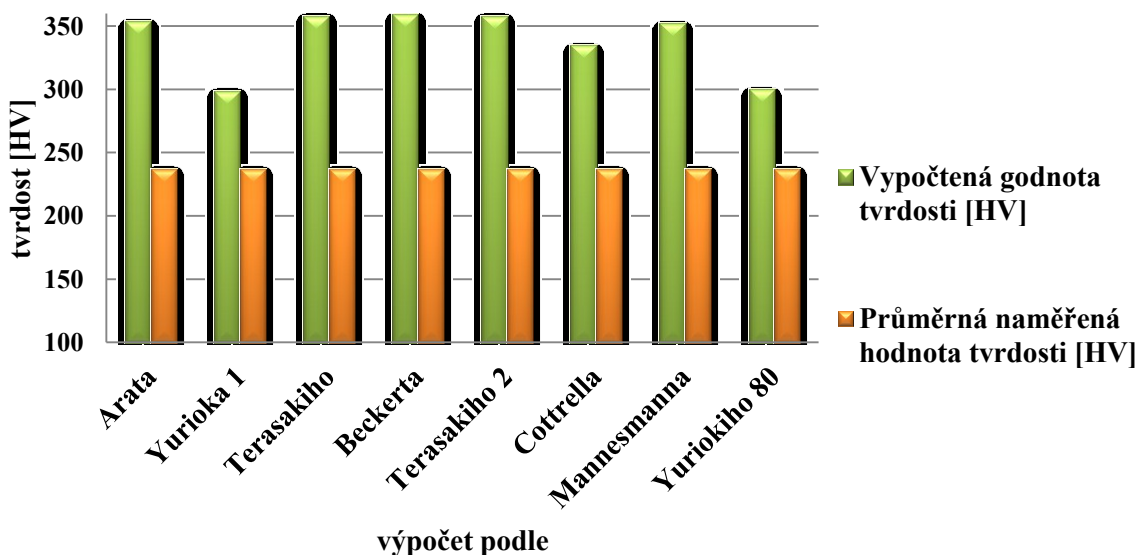
Největších rozdílů dosahovaly hodnoty u výpočtů závislých na čase $t_{8/5}$. Je zajímavé, že hodnoty vypočtené podle Yuriho 80 byli jak pro maximální a minimální chemické složení konstantní i při narůstajícím čase. A zatímco hodnoty vypočtené dle Cotterella a Mannesmanna s narůstajícím časem klesají, hodnoty zjištěné dle vzorců Terasakiho 1 a Yurioka 2 s narůstajícím časem vzrůstaly jak pro minimální i maximální chemické složení. Z tabulky 12 je rovněž patrné, že chemické složení dosažené výsledky ovlivnilo u každého algoritmu jinak. Např. zatímco u výpočtu dle Yuriho 80 se výpočty pro maximální a minimální chemické složení mezi sebou velice liší, tak dle výpočtu podle Yurioka 2 a Terasakiho 1 se mezi sebou liší minimálně a u výpočtu dle Mannesmanna a Cotterella hodnoty pro maximální chemické složení jsou vyšší jak pro minimální chemické složení a tvoří tak sestupnou řadu.

Hodnoty nezávislé na čase $t_{8/5}$ se mezi sebou liší minimálně pro obě uvedená chemická složení. Vypočtené hodnoty pro maximální chemické složení jsou vyšší než pro minimální chemické složení. Hodnoty se pohybují v rozsahu 358-356 HV pro minimální chemické složení a pro maximální chemické složení v rozmezí 390-401 HV. Pro praxi jsou spíše použitelnější algoritmy závislé na čase ochlazování $t_{8/5}$, neboť jak je z tabulky 12 patrné změnou času ochlazování lze ovlivnit tvrdost této oceli.

Výsledné hodnoty dle softwaru Weldsoft se mezi sebou liší jak v hodnotách dosažených pro minimální chemické složení, tak v hodnotách dosažených pro maximální chemické složení. I zde vychází nereálné hodnoty ve výpočtu dle Duerena, Yurioka 1. Hodnoty se opět mezi sebou liší až o několik desítek HV.

I při výpočtech pomocí tohoto softwaru u některých vzorců, podle Arata, Beckerta a Terasakiho, byly hodnoty konstantní u minimálního i maximálního chemického složení, přestože vzrůstaly hodnoty svařovacích parametrů. U výpočtu podle Cottrella a Yurioka 2 dosažené hodnoty s rostoucími svařovacími parametry klesaly pro minimální i maximální chemické složení. Oproti tomu vypočtené hodnoty dle Suzukiho u minimálního chemického složení klesají a u maximálního chemického složení došlo se zvyšováním svařovacích parametrů k nárůstu hodnot. Hodnoty u jednotlivých výpočtů pro maximální a minimální chemické složení se mezi sebou liší opět v rozmezí několika desítek HV.

Graf na obrázku 7 znázorňuje porovnání naměřené a vypočtené hodnoty tvrdosti pro tuto ocel. Jednotlivé algoritmy byly vybrány podle průměrné naměřené hodnoty tvrdosti. Z grafu je patrné, že vypočtené hodnoty převyšují průměrné naměřené hodnoty tvrdosti. Nejvíce se k reálné hodnotě blíží hodnota vypočtená podle Yurioka 1.



Obr. 7 – Porovnání naměřené a vypočtené hodnoty tvrdosti pro ocel P91

Hodnoty po tepelném zpracování

Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování pomocí softwaru Weldsoft jsou velice závislé na teplotě a to při minimálním i maximálním chemickém složení. Výsledné hodnoty při zvyšování teploty za konstantní výdrže klesaly jak u maximálního

chemického i u minimálního chemického složení. Hodnoty pro minimální chemické složení se při zvyšování teploty za konstantní výdrže pohybují v rozsahu od 240-347 HV a pro maximální chemické složení za týchž podmínek v rozmezí 317-438 HV. Z toho plyne, že za daných podmínek hodnoty tvrdosti jsou závislé především na teplotě a méně už na svařovacích parametrech. Z tabulky 24 plyne, že hodnoty po tepelném zpracování jsou závislé dále na výdrži, protože při konstantních svařovacích parametrech a teplotě se vzrůstající výdrží vypočtené hodnoty klesaly jak pro minimální chemické hodnoty, a to v rozmezí od 417 HV do 246 HV, tak pro maximální chemické složení v rozmezí 518-323 HV.

Hodnoty tvrdosti po tepelném zpracování naměřené v praxi u pěti vzorků se pohybují v rozmezí 199-255 HV při tvrdosti vstupních materiálů pohybující se v rozsahu 168-201 HV. Pokud bychom tyto hodnoty porovnali s hodnotami z tabulky 24, můžeme dojít k závěru, že k navolení vhodných parametrů pro dosažení optimální tvrdosti, nestačí pouze teoretické výpočty, ale je nutné si tyto hodnoty ověřit v praxi, neboť složení ocele není vždy stejné.

4.2 Ocel 15128

Hodnoty tvrdosti po svaření

U výpočtů pomocí softwaru e-Weld-Hardness se hodnoty mezi sebou liší jak pro maximální tak minimální chemické složení viz. tabulka 13. Nereálné hodnoty vycházely pouze u jediného algoritmu a to u výpočtu nezávislého na čase $t_{8/5}$ podle Deardena 2.

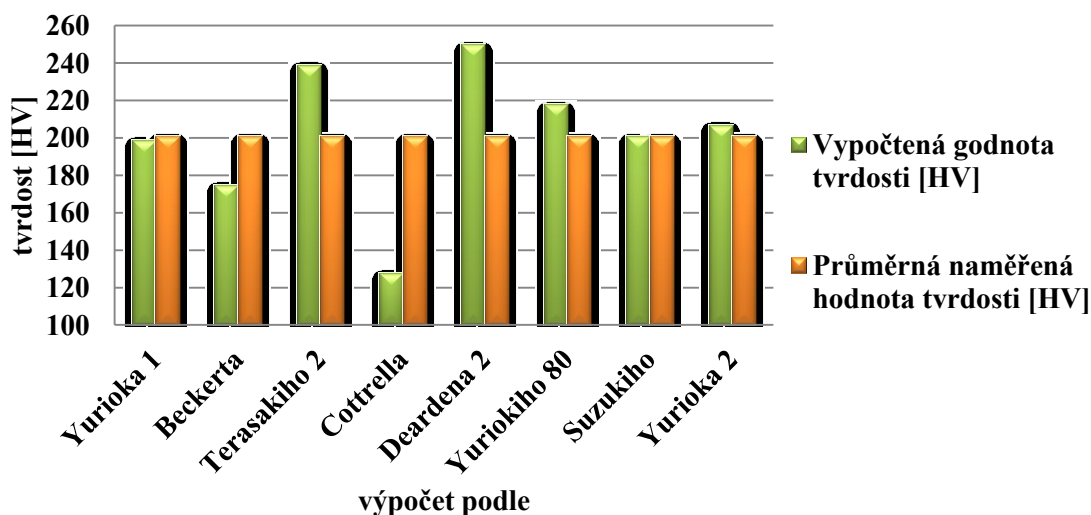
Výpočty závislé na čase $t_{8/5}$ se mezi sebou značně liší – nejmenší hodnot dosahují u minimálního složení hodnoty dle Yurioka 2, které se pohybují od 285-240 HV v závislosti na vzrůstajícím čase, zatímco nejvyšších hodnot dosahují výpočty podle Duerena 2, jenž se pohybují v rozmezí od 409-289 HV opět v závislosti na vzrůstajícím čase. Hodnoty získané u výpočtu podle Mannesmanna narůstají v závislosti na vzrůstajícím čase jak u minimálního, tak u maximálního složení, u výpočtu podle Yurioka 2 pro minimální chemické složení vypočtené hodnoty klesají se vzrůstajícím časem, zatímco pro maximální chemické složení vzrůstaly. U ostatních výpočtů hodnoty klesají v závislosti na čase $t_{8/5}$ klesaly u minimálního i maximálního chemického složení.

U zjištěných hodnot pomocí algoritmů nezávislých na čase rozdíl ve výsledcích je minimální pro minimální i maximální chemické složení. Pro praxi jsou opět

použitelnější hodnoty získané pomocí výpočtových algoritmů závislých na čase ochlazování, neboť tento umožňuje dosáhnout optimálnějších hodnot tvrdosti svarových spojů této oceli.

Hodnoty tvrdosti vypočtené pomocí softwaru Weldsoft pro minimální chemické složení kolísají v rozmezí 175-340 HV v závislosti na použitém algoritmu a na zvolených svařovacích parametrech. Pro maximální chemické složení kolísají od 193 HV do 449 HV opět v závislosti na algoritmu a na svařovacích parametrech. Z tabulky 17 můžeme vyčíst, že u všech použitých algoritmů hodnoty v závislosti na zvyšovaných hodnotách svařovacích parametrů klesají a to jak u minimálního tak maximálního složení.

Z Grafu na obrázku 8, na kterém je znázorněno porovnání průměrné a vypočtené hodnoty tvrdosti, je patrné, že výpočty pro tuto ocel kolísaly více než u předchozí oceli. Vypočtené hodnoty se pohybují nad i pod průměrnou naměřenou hodnotou tvrdosti. Avšak oproti oceli P91 rozdíl ve vypočtených a naměřených hodnotách není tak značný a proto jsou algoritmy použité u této oceli použitelnější v praxi. Nejvíce se reálným hodnotám přibližují hodnoty vypočtené podle Suzukiho, Yurioka 1 a Yurioka 2.



Obr. 8 – Porovnání naměřených a vypočtené hodnoty tvrdosti pro ocel 15128

Hodnoty po tepelném zpracování

Vypočtené hodnoty pomocí programu Weldsoft po tepelném zpracování u této oceli se při vzrůstající teplotě, svařovacích parametrech a za konstantní výdrže u minimálního i maximálního chemického složení klesají. U minimálního chemického složení se pohybují

v rozmezí 123-215 HV a u maximálního chemického složení v rozsahu 171-304 HV. Hodnoty klesají, i když byly svařovací parametry a teplota konstantní a zvyšovala se pouze výdrž a to u minimálního chemického složení v rozmezí 215-151 HV a u maximálního v rozmezí 289-209 HV. Z toho plyne, že tvrdost svarových spojů závisí nejen na svařovacích parametrech, ale také na teplotě a na výdrži.

U praktického měření tvrdosti svarových spojů při tvrdosti základních materiálů 150-201 HV u pěti vzorků se tvrdost svarových spojů pohybuje v rozmezí 240-249 HV. Pokud bychom porovnali výsledky s vypočtenými hodnotami, tak bychom došli k závěru, že naměřené hodnoty se moc, na rozdíl od oceli P91, neliší. Z toho plyne, že pro tuto ocel můžeme zjistit vhodné parametry pro optimální tvrdost svarových spojů pomocí výpočtů.

5. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo porovnání skutečných naměřených hodnot tvrdosti svarových spojů dvou vybraných ocelí, ocele P91 a ocele 15128, dosažených při použití různých svařovacích parametrů s predikcí vybraných algoritmů vypočtených za pomoci dvou softwarů – e-Weld-Hardness a Weldsoft.

Z vypočtených hodnot pomocí obou programů je zřetelné, že na tvrdost svarových spojů o obou ocelích má vliv chemické složení, svařovací parametry a parametry tepelného zpracování, a to zejména čas ochlazování, doba výdrže a teplota. Z toho plyne, že vypočtené hodnoty nezávislé na čase ochlazování jsou pro praxi nepoužitelné, neboť změnou času lze ovlivnit tvrdost těchto ocelí.

Vliv má i chemické složení neboť každý z algoritmů pracoval se složením ocelí jiným způsobem a tato skutečnost se následně odrazila i v získaných hodnotách, neboť se dosažené výsledky vypočtené pomocí různých algoritmů neliší pouze mezi sebou, ale také se liší pro minimální a maximální chemické složení.

Hodnoty získané pomocí uvedených softwarů se mezi sebou příliš neliší ani pro tvrdost po svaření ani pro tvrdost po tepelném zpracování. Ovšem po porovnání hodnot tvrdosti svarových spojů pro ocel P91 získaných pomocí softwaru Weldsoft s hodnotami získanými pomocí praktického měření lze dojít k závěru, že pro navolení vhodných parametrů pro dosažení optimální tvrdosti nestačí pouze teoretické výpočty, ale je nutné tyto hodnoty ověřit v praxi.

U ocele 15128 rozdíly mezi tvrdostí zjištěnou pomocí softwaru Weldsoft a prakticky naměřenými hodnotami se mezi sebou liší méně, takže u této oceli můžeme navolit vhodné parametry pro získání optimální tvrdosti svarových spojů pomocí výpočtů. Přesto by se měly udělat kontrolní měření, to platí pro obě oceli, neboť chemické složení není vždy stejné, a to ani u vstupních materiálů, a má značný vliv na tvrdost svarových spojů.

Některé algoritmy pro predikci tvrdosti u vybraných ocelí, P91 a 15128, nelze použít, neboť při jejich použití vychází nereálné výsledky. To ovšem nevylučuje jejich použití pro jiný typ oceli.

Pro použití v praxi je nutné upravit algoritmy, které se svým výpočtem nejvíce blížily reálným hodnotám na základě experimentu navrženého přesně pro tyto typy materiálů s ohledem na rozsah svařovacích příkonů, parametrů a režimy tepelného zpracování.

Bakalářská práce plně obsáhla a vyřešila zadané téma.

6. Seznam použité literatury

- [1] HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. Bratislava : Slovenskej akadémie vied, 1989. 344s. ISBN 80-224-0016-5.
- [2] KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. 2009. 136 s ISBN 80-248-0870-6
- [3] KUČERA, Jan. *Teorie svařování*. Ostrava : Vysoká škola báňská v Ostravě, 1987. 408s.
- [4] KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK, Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava : Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava; VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009. 241s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [5] KOIVULA, J. *The Effect of GMA – Welding Parameters and Alloying Elements on the Hydrogen Induced Cracking in Low Carbon Cr Steel*. Doc. IIW-IX-1109-79
- [6] PURMENSKÝ, Jaroslav; FOLDYNA, Václav; MATOCHA, Karel. Perspektivní žárupevné oceli a jejich vlastnosti a praktické využití. In *Metal 2006, Hradec nad Moravicí, 23. – 25. května 2006*. Sborník [on-line]. 2006 [cit. 8. leden 2011] Dostupné z WWW: <<http://www.nanocon.cz/data/metal2006/sbornik/papers/162.pdf>>
- [7] SCHWARZ, Drahomír; KOUKAL, Jaroslav; SONDEL, Martin. *Ověření vlastností svarového spoje ocelí P91 a 15128 po dlouhodobé teplotní expozici* [online]. KONSTRUKCE media s.r.o., 11. listopadu 2010 [cit. 10. ledna 2011]. Dostupné na <<http://www.konstrukce.cz/clanek/overeni-vlastnosti-svaroveho-spoje-oceli-p91-a-15128-po-dlouhodobem-teplotni-expozici/>>
- [8] ČSN EN 10222-2 (42 0291). *Ocelové výkovky pro tlakové nádoby a zařízení – Část 2: Feritické a martenzitické oceli pro použití při vyšších teplotách*. 2002.
- [9] ČSN 41 5128. *Ocel 15 128 Cr-Mo-V*. 1985.

- [10] FÜRBAACHER, Ivan. *Lexikon ocelí* [CD]. Praha : Verlag Dashöfer nakladatelství s.r.o., 2006 [cit. 2011-04-04]. Řada 1.2.
- [11] TVRDÝ, M. , BARDONŇOVÁ, B. *Katalog diagramů anisotermického rozpadu austenitu*. VŽKG.1970.
- [12] *Effect of Normalization and Temper Heat Treatment on P91 Weldment Properties*, EPRI, Palo Alto, CA: 2003. 1004915.
- [13] ČSN EN 1043-1 (05 1134). *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška tvrdosti – Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. 1998.
- [14] ČSN EN 1011-2 (05 2210). *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*. 2001.
- [15] Ochodek, Vl. *e-Weld – Hardness*. VŠB TU Ostrava.
- [16] Chan, B., Bibby, M. *Weldsoft v.2*. Carlton University.
- [17] ESAB [online] [cit. 10. 4. 2011]. *Přídavné svařovací materiály*. Dostupné z WWW: <<http://products.esab.com/Templates/T008.asp?id=70469>>
- [18] Bocquet, P.; Bourges, P.; Cheviet, A. Properties of heavy components of steel grade 91 and their welds. *Nuclear Engineering and Design* 1993, (144), 149–154.
- [19] *EPRI Conference on 9CR Materials Fabrication and Joining Technologies*, EPRI, Palo Alto, CA: 2001. 1006299.
- [20] Nobutaka, Y. Physical Metallurgy of Steel Weldability. *ISIJ International* 2001, (41), 566–570.
- [21] *Svarservis Thermoprozess Cooperheat s.r.o.*, Novoveská 5D, 709 00 Ostrava – Mariánské Hory


7. Seznam příloh

Kompletní bakalářská práce je v daném rozsahu v elektronické podobě na CD mediu.

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Vladislavu Ochodkovi za odborné připomínky a pomoc při vypracování bakalářské práce.

V Ostravě 23. května 2011


.....
podpis studenta